新疆和田河对两侧风沙地貌空间格局的影响

王旭旻[1,2]，　高　鑫[1]，　胡子豪[3]，　周　杰[1]
（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 应急管理大学（筹）应急管理学院，北京 101601）

摘　要： 风水交互作用对风沙地貌的形态和空间分布格局具有十分重要的塑造作用，如何量化河流对风沙地貌的影响一直是风沙地貌研究的难点。选取塔克拉玛干沙漠的和田河流域及其两侧风沙地貌作为研究对象，基于高分辨率遥感影像、DEM和NDVI数据，通过典型横断面相关特征参数对比、风沙地貌格局和河道形态参数的变化分析等方面的研究。结果表明：（1）在和田河与风沙地貌交汇区，NDVI值0.05可作为判别河流对风沙地貌格局影响的临界值，据此确定了和田河对风沙地貌的影响范围，面积约为20700 km^2，宽度介于6~121 km。（2）和田河的河道形态变化较小，难以引起河道长距离的侧向迁移，对两侧风沙地貌的影响区域不会发生显著变化；风水交互作用过程中河流起主导作用，其中南段属于完全由河流主导型、北段属于主要由河流主导型。（3）可识别的风沙地貌分布格局为：从河道向两侧依次为灌丛沙丘、线形沙丘、横向沙垄和格状沙丘，这一格局是长期风水交互作用的结果。研究结果对于理解类似地区河流对风沙地貌格局的影响具有借鉴意义。

关键词： 和田河；风沙地貌格局；沙丘类型；风水交互作用；塔克拉玛干沙漠

风力和流水是塑造地貌形态的两大主要外营力。风沙地貌主要是由风力作用主导下形成的地貌景观，广泛分布在干旱、半干旱地区[1]。河流地貌可以发育在不同气候类型的地区，在干燥的沙漠地区，水源丰沛的河流可以流经沙漠边缘，或者流入沙漠腹地，甚至穿越沙漠，形成风沙与河流地貌过程交互作用带，如撒哈拉东北部的河流风沙系统[2]，加拿大威廉河沿岸的阿萨巴斯卡沙丘[3]，南极洲维多利亚河谷的沙丘[4]等。当河流和沙漠相遇，两个系统之间的相互作用会导致其中之一或两者的地貌形态发生不同程度的变化[5]。在沙漠与河流过渡带，流水与风力对干旱区地貌的发育过程均起到重要作用[6]。近年来，风水交互作用的重要性备受关注[7-11]。在风水交互作用过程中，河流搬运的泥沙为风沙地貌的演化提供了物源，而风沙地貌为河流提供了沙源和非约束性的河道边界条件[12]。

在风水交互作用地区，河流流向与风向具有不同的交会角。以河流在沙漠段的起止点连线为其流向，沙丘移动方向作为风沙地貌的主导风向，利用Google Earth影像对全球230个地点的河流与沙丘地貌格局的调查结果表明，河流流向与风向间存在着垂直、平行、斜交等不同的交会角[5]。不同类型沙丘与河流的交会角在出现频率上存在显著差别。横向沙丘与河流的交会角中，出现频率最高的为90°，且远高于其他沙丘类型与河流的交会角；相对而言，新月形沙丘、纵向沙丘与河流间交会角的最高频率并不高。但是，对于某一具体的沙漠河流交汇区，同类沙丘与河流的交会角会局限于很小的变动范围。

风力和水力作用的相对大小通常是区分风水交互作用中何者为主导的关键指标[5,13]，据此，有学者提出了风力过程为主、水力过程为主和风水交互为主的三种类型[13]，确定了完全由风力主导、主要由风力主导、风水平衡主导、主要由河流主导、完全

收稿日期： 2024-11-07；　**修订日期：** 2024-11-26
基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目-塔里木河流域干旱与风沙灾害调查和风险评估（2021xjkk0300）；新疆天山英才-科技创新领军人才项目（2022TSYCLJ0002）
作者简介： 王旭旻（2000-），男，硕士研究生，主要从事风沙地貌与风沙环境研究. E-mail: wangxumin22@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 高鑫. E-mail: gaoxin@ms.xjb.ac.cn

由河流主导，以及风水交替主导的六类型划分方案。也有学者为区分河流与沙丘地貌的空间分布格局，依据河型、河流流向、风向和沙丘延伸方向等指标，将河流与沙丘的分布格局划分为沙丘穿越、平行、垂直、网状孤立等10种类型[14]。前者强调风水交互作用过程中的主导性，后者突出河流风沙地貌空间分布上的差异性。实际上，后一种分类体系所展示的空间分布格局，也离不开风水交互作用及其相对大小的影响。

塔克拉玛干沙漠发育在塔里木盆地中央，发源于周围山脉的一系列河流流入盆地，其中部分河流流入甚至穿越沙漠，形成了一系列河流和沙漠的交互作用带。前人对这些河流风沙地貌交汇区的形成演变及影响因素进行过相关探讨[15-18]。也有学者分析过该地区河流与风沙交汇区的主导作用力[18]。无论如何，沙漠与河流过渡带中，风水交互作用决定着河流与沙丘地貌的空间格局，不同的交汇方式会影响到水力和风力的交互作用强度。河流径流量的季节性变化也会影响风水交互作用的强度，甚至阶段性地改变河流和风沙的主导地位。此外，河流演变中的侧向迁移、风沙作用对河流的影响方式等，也会影响到两类外营力作用的相对强弱。因此，在风力主导的沙漠地区，穿越沙漠的河流对风沙地貌的影响程度，仍然是风沙地貌形成演化和空间格局研究中的重要科学问题。河流对风沙地貌空间格局的影响主要有两种方式：其一是河流侵蚀和搬运风沙的直接作用，其影响范围限于河道带和洪泛河道带；其二是河水补给地下水、促进河岸带植被发育从而增强固沙能力的间接作用，其影响范围可以通过反映植被发育状况的NDVI的临界值进行确定。河流对风沙地貌的影响程度可以根据河流的贯通性、侧向迁移能力、河道典型地貌参数大小、径流量及其波动性、滨河带植被发育程度及其宽度，以及区域风况等关键指标进行综合分析。

本研究选取塔克拉玛干沙漠中和田河流域及两侧风沙地貌作为研究对象（图1），基于流域两侧NDVI的空间分布，探寻指示河流影响范围的NDVI临界指标，明晰河流与风沙地貌的典型空间格局，揭示河流对风沙地貌的影响范围、强度和方式。研究结果有助于深化认识河流对风沙地貌的塑造作用及量化区域风水交互作用的主导因素。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于中国新疆的塔里木盆地（图1a），东西长约1000 km，南北宽约400 km，面积达33.76×10^4 km^2，是中国境内最大的沙漠，也是全世界第二大流动沙漠，其中流动沙丘的面积占比超过80%[19]。沙漠的北、西、南三面分别为天山山脉、帕米尔高原以及昆仑山脉和阿尔金山脉，东临罗布泊坳陷[20]。沙漠属极度干旱的大陆性气候类型[21]，年均气温介于9.9~12.6 ℃，酷暑最高气温可达67.2 ℃，昼夜最大温差超过40 ℃。年均降水量介于17.4~66.3 mm[22]，而年均蒸发量高达2500~3400 mm[23]。沙漠的东部和东南部以东北风为主，西部和北部则以西风、北风和西北风为主[22,24]。塔克拉玛干沙漠的风沙粒径极细且干燥度大，在频繁风力作用下易于流动和扬尘，因而，该沙漠是东亚乃至全球粉尘的主要来源区[25]。

研究区位于塔克拉玛干沙漠西部的和田河流域及其两侧风沙地貌区（图1），包括喀拉喀什河（喀河）、玉龙喀什河（玉河）及和田河干流的河流地貌分布区，以及两侧风沙地貌分布区，研究范围介于36.51°~40.24°N和79.24°~81.55°E之间。研究区内，和田河由南向北纵贯整个沙漠，与两侧风沙地貌长期的交互作用过程中，维持着河流的通畅性。和田河河源多年平均径流量（喀河的乌鲁瓦提站和玉河的同古孜洛克站的径流之和）为51.4×10^8 m^3，干流入口及出口水文站（肖塔站）的多年平均径流量分别为18.59×10^8 m^3和12.76×10^8 m^3[26]，有效地维护了和田河两岸及塔里木河的生态系统，并且对风沙地貌的演变起着重要影响。研究区风沙地貌类型多样，包括灌丛沙丘、纵向沙丘、横向沙丘和格状沙丘等。所选择的区域是研究河流对两侧风沙地貌空间格局影响的理想区域。

1.2 数据来源

数据资料包括遥感影像、DEM（数字高程模型）数据、NDVI（归一化植被指数）数据和风况数据等。研究区及纵横断面的遥感影像、DEM数据和NDVI空间分布数据来自谷歌地图，分辨率为7.5~30 m。所选遥感影像拍摄于2013年和2022年，便于目视分析典型地段风沙地貌格局及河流影响程度；NDVI

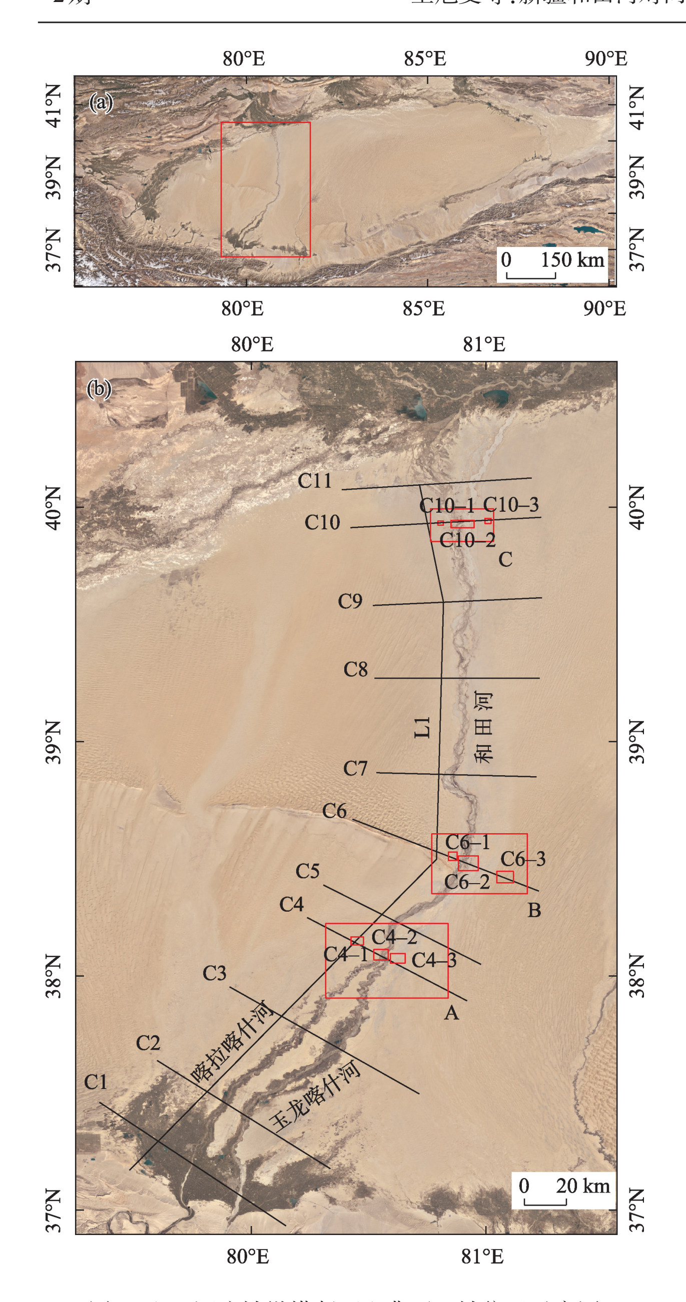


图1　和田河流域纵横断面和典型区域位置示意图

Fig. 1　Location diagram of a longitudinal profile, cross sections, and typical areas in the Hotan River Basin

空间分布数据包括2013—2022年间的各年数据和10 a平均数据两类。图1b中的A、B和C区所选的遥感影像分辨率为0.94 m,其他9个小区的为0.47 m。风况数据从中国气象数据网(http://www.data.cma.cn)下载。上述各类数据及其分辨率均可满足该研究工作的需要。

1.3　研究方法

基于NDVI辨识河流影响区域的方法。选取与和田河或其支流河道垂直的11个横断面(C1, C2,···,C11)作为研究NDVI横向变化趋势、反映河流对风沙地貌格局横向影响范围的控制线(图1b)。沿断面C4选择了A区域、断面C6选择了B区域、断面C10选择了C区域,作为研究河流影响风沙地貌空间变化的典型区域。在A、B、C区域,分别沿断面C4、C6和C10各选定3个典型小区域以便提取高分辨率遥感影像,用以对比研究河道演变、揭示其对两侧风沙地貌格局的影响。选取纵剖面L1研究和田河及其支流喀拉喀什河左侧近岸地带NDVI的沿程变化趋势,分析河流对其两侧风沙地貌的影响。NDVI直接受近红外通道反射率(*NIR*)与红光反射率(*R*)的影响,其计算公式为:

$$\mathrm{NDVI}=\frac{NIR-R}{NIR+R}$$

基于ArcMap 10.8平台,对图1b中纵横断面和各类重点区域的边界进行数字化,沿纵横断面提取2013—2022年NDVI的年值和多年平均值以及所需要的DEM数据。利用遥感图像目视解译方法分析河道两侧典型区段的风沙地貌空间格局及其变化特征,结合典型小区高精度微地貌变化特征,分析河流对风沙地貌格局的影响范围。

不同区段河流形态参数的量算方法。结合遥感影像数据和DEM数据,提取相邻横断面间的河道长度(l)、河谷长度(L)数据、各横断面与河道中线交点的海拔高程数据(用以计算断面间河道中线的高差,Δh),从而获得河段间的河道弯曲度(S)和河道比降(J),其中$S=l/L$,$J=\Delta h/L$。

河流与盛行风向交会角的观测方法。根据Liu等[5]的研究实践,河流的流向为河流在沙漠段的起点和终点的连线方向。沙丘移动方向作为风沙地貌的主导风向,其中新月形沙丘的主导风向与沙丘凸点到两角的对称轴线平行,横向沙丘的主导风向垂直于其脊线,纵向沙丘的主导风向平行于其脊线。由此获得的流向和主导风向,其夹角即是河流与主导风向的交会角。

2　结果与分析

2.1　NDVI变化及河流的影响

2.1.1　横断面NDVI变化特征　图2为研究区所选的11个横断面2013—2022年NDVI的变化。每个断面的起点为其西端点,终点为其东端点。横断面C1~C3代表和田河出山口冲积扇植被覆盖度的变化特征,其中C1的NDVI总体上介于0.2~0.6之间,整

体呈现出高值；C2和C3的NDVI在河道附近呈现显著高值区，远离河道两侧则出现低值。

横断面C4~C9位于塔克拉玛干沙漠地区的和田河中部河段，其NDVI的变化反映河流对植被分布的横向影响。横断面上的NDVI都在河道两侧附近区域呈现明显高值，表明河流对促进近岸带的植被发育的显著影响。在河道的一侧也会出现NDVI的高值区，表明该区域的水分供给相对充足。

横断面C10和C11横跨和田河沙漠区的末段，与前述中部河段的断面相比，这两个断面上河道两侧NDVI高值区向两侧延伸更远，反映和田河在该河道段相对宽浅、汊道有所增多。汛期流量较大时，水流会在多个汊道中流动，为河流两侧较为宽阔的风沙地貌区提供相对充足的水分，促进植被在河道带外侧较为宽阔的区域生长发育。

2.1.2 纵剖面NDVI变化特征 沿着喀拉喀什河及和田河左岸附近设置的纵剖面L1（图1），起始点分别为其南部和北部的端点，绘制NDVI的纵向变化特征（图3）。

NDVI在纵剖面南部50 km以内呈现显著高值，这是对和田河在昆仑山前冲积扇上覆盖度较高植被分布态势的反应。在纵剖面长度30~100 km区间，NDVI显著变小，由大于0.6急剧减小到小于0.05。在100~140 km的区段，NDVI略微增大，总体上超过0.05。在纵剖面长度的140~320 km区间，NDVI基本小于0.05，但在纵剖面长度330 km处的河段，NDVI明显增大。与横断面NDVI不同年份的变化类似，2013—2022年间，纵剖面上NDVI的高值区、低值区和纵向变化趋势基本保持不变，表明沿纵剖面的植被分布具有稳定性。

2.1.3 河流影响与NDVI临界值 河流的水分供给影响着其两侧植被的发育状况。在横断面C4、C6和C10各选取包括河道在内的20 km长的区段，以进一步探讨河流影响区域、沙丘形态和植被发育状况间的关系。上述区段年均NDVI和DEM横向变化曲线如图4所示。河道两侧的NDVI较高，通常大于

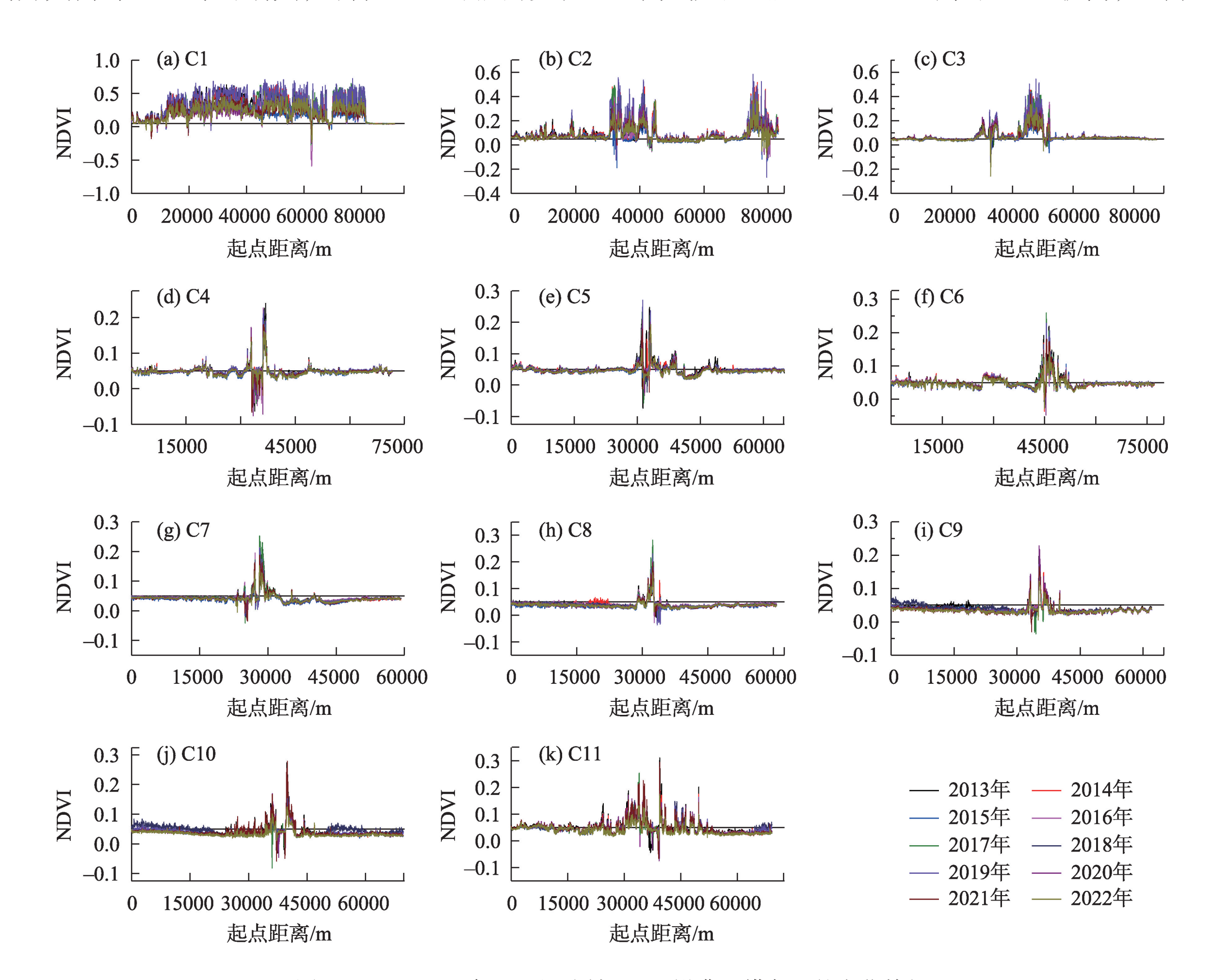


图2 2013—2022年和田河流域NDVI沿典型横断面的变化特征

Fig. 2 NDVI variations along the cross-sections in the Hotan River Basin in 2013-2022

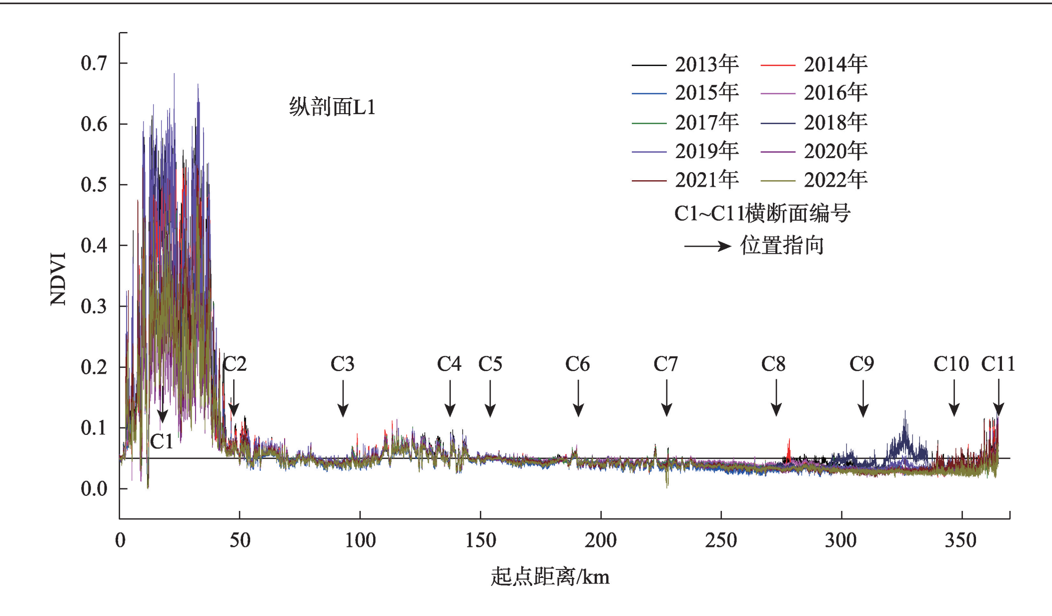


图3　不同年份NDVI沿河流纵剖面L1的变化特征

Fig. 3　Variation characteristics of NDVI along the longitudinal profile L1 in 2013−2022

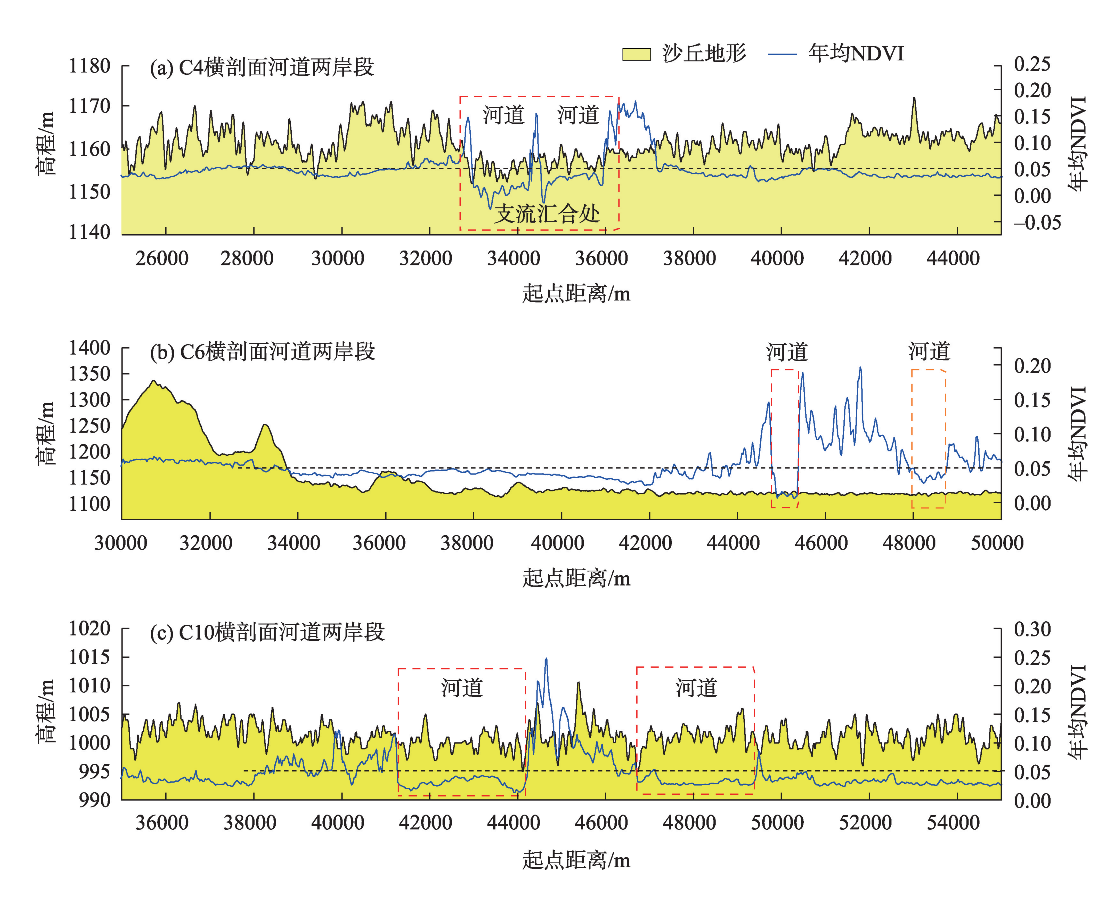


图4　和田河两岸的沙丘地形和NDVI变化特征

Fig. 4　Aeolian dune topography and NDVI variation characteristics on both sides of the Hotan River

0.05，而河道外侧远处的NDVI明显小于0.05。NDVI大于0.05的区域，在C4断面上左右河岸外侧的宽度分别为1.5 km和1.2 km，C6断面上的分别为1.5 km和2.5 km，C10断面上的分别约为3.0 km和2.5 km。此外，NDVI大于0.05的区域也存在于季节性洪泛河道两侧，但其宽度远小于主河道的。上述植被相对发育的区域以灌丛沙丘为主，沿和田河两岸呈带状分布。

从C4断面上DEM的变化可见,在灌丛沙丘发育区的外侧,是纵向沙垄分布区域,其特征是沙垄的最大高差在河道两侧区域可达17 m,而NDVI几乎都小于0.05。C6断面上DEM变化显著,表明沙丘类型有变化,河道左侧灌丛沙丘区的外侧,依次分布着最大高差可达35 m的纵向沙垄,以及最大高差接近200 m的横向沙垄。C10断面上DEM的最大高差小于15 m,自河道向两侧,依次出现灌丛沙丘和高差较小的纵向沙垄。

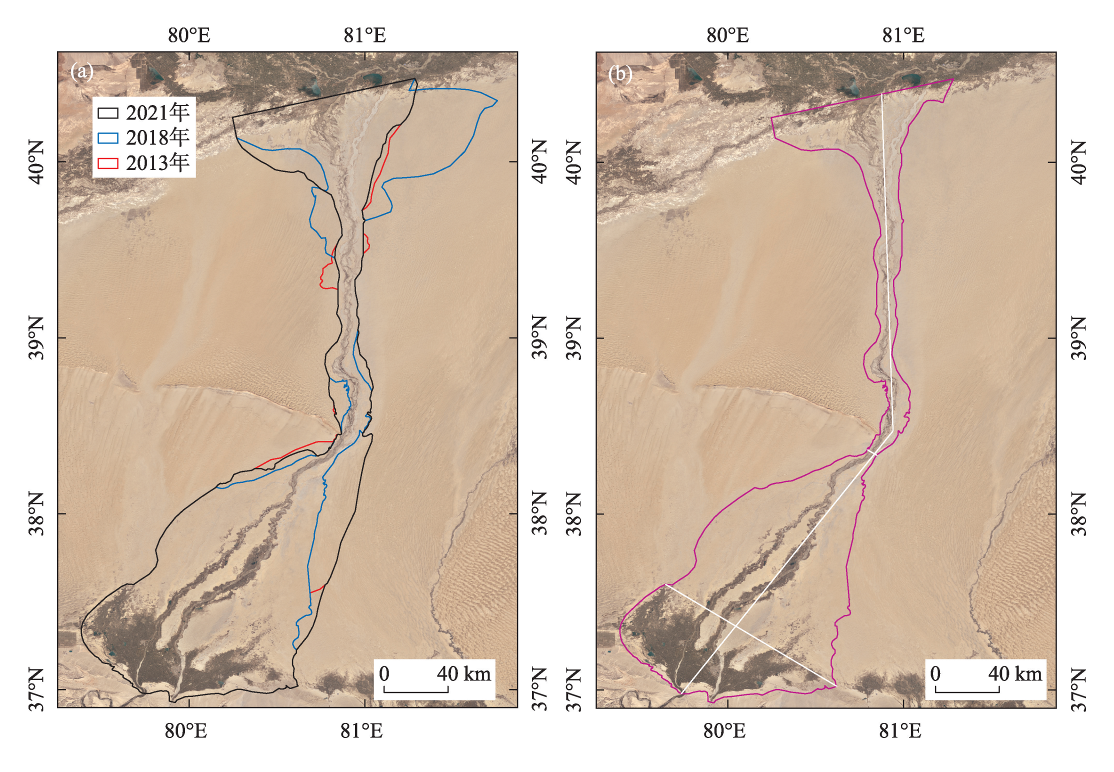
上述现象表明,断面上NDVI的高值区明显受到河流的影响,NDVI等于0.05是和田河对植被影响的临界值。

2.2 河流影响区域及风沙地貌格局

2.2.1 河流影响区域 和田河两侧NDVI大于0.05的区域,既是河流影响植被的区域,也是河流影响风沙地貌格局的区域,因此,NDVI等于0.05可作为河流影响风沙地貌区域的临界值(图5a)。和田河对其两侧风沙地貌格局的影响区域在不同年份有所不同。与2013年相比,2018年的河流影响区域在和田河的中南部明显收缩,在其北部的河流右岸区域显著扩张,左岸区域沿程表现出先扩张后收缩的规律。2021年河流的影响区域仅在和田河(支流玉龙喀什河)右侧南段、中部和北部左侧各有一段小区域有所扩展,而在和田河北段的右侧区域略有扩展。总体上来看,2013年和2021年的影响区域比较一致,而2018年的相较前二者差异明显,主要表现为河流的影响区域在上游段以收缩为主,下游段以扩张为主。在上述年份,和田河对周边沙漠格局影响区域的面积分别为2.48×10^4 km^2,2.49×10^4 km^{2}和2.51×10^4 km^2,总体上变化不明显。

图5b为2013—2022年间平均NDVI等值线0.05的区域,是河流对其周边风沙地貌格局的平均影响区域,其面积为2.07×10^4 km^2。河流影响区域的最大宽度在南部绿洲地段,可达121 km;最小宽度在和田河中部,仅为6 km。和田河贯穿沙漠腹地,自南向北其对风沙地貌的影响长度可达460 km。这表明和田河对其周边风沙地貌的影响区域以南段为主,北段次之,而在中部最小。

2.2.2 河流风沙地貌格局 河流流向和盛行风下风向的交会角对风沙地貌格局具有重要影响。和田河周边主要气象站30 a的平均风况数据(表1)表明,流域不同区段的盛行风向明显不同,如和田河



注:(a) 典型年份的影响区域;(b) 2013—2022年间平均影响区域。

图5 和田河对两侧沙丘地貌影响范围的时空变化特征

Fig. 5 Spatiotemporal variations of the influence area of the Hotan River on the surrounding aeolian landforms

表1 和田河周边主要气象站1991—2020年的平均风况特征

Tab. 1 Characteristics of the average wind conditions of the main meteorological stations around the Hotan River from 1991 to 2020

位置	站点	最大风速/(m·s^{-1})	平均风速/(m·s^{-1})	盛行风向代号	盛行风向/(°)	盛行风向频率/%
北部	阿克苏	18.5	1.7	2	11.25~33.75	10
	阿拉尔	13.1	1.4	3	33.75~56.25	13
东部	策勒	10.0	1.3	13	258.75~281.25	12
	于田	14.0	1.2	13	258.75~281.25	8
	民丰	16.0	1.6	3	33.75~56.25	12
	塔中	20.0	2.2	4	56.25~78.75	13
南部	墨玉	11.7	1.3	15	303.75~326.25	7
	和田	15.0	2.0	11	213.75~236.25	11
	洛浦	13.6	1.7	13	258.75~281.25	10
西部	麦盖提	12.5	1.3	3	33.75~56.25	8
	莎车	12.0	1.3	15	303.75~326.25	10
	皮山	13.5	1.5	15	303.75~326.25	10

北段的以北北东向为主;东南部的策勒和于田站,以及南部的都以西风为主;西部的以西北风为主,个别站也有东北风为主的(麦盖提站)。和田河流域及外围的盛行风向多变,而且中部地段在河流东西两侧的气象站距离遥远,难以利用现有气象站准确判断河流两侧附近的盛行风向。根据河流两侧沙丘形态特征能够反映流沙的净移动方向(即盛行风向的下风向),这样可以更准确地测定河流与盛行风下风向的交会角等复合地貌参数。

和田河及其支流在交汇区的流向为18°(起止点连线的方位角)。图6中A、B、C区域可用来比较和田河及风沙地貌在2013—2022年间的空间变化特征。

A区是横断面C4所贯通的矩形区域(图1),涵盖和田河的支流汇合处上下河段及周边风沙地貌。由图6 A区的遥感图像可见,河湾和部分心滩边缘发生明显侧蚀,但河道的总体形态无明显变化,风水交互作用中河流起着主导作用。河漫滩平坦,可见洪泛河道。在河漫滩外侧分布着纵向沙垄,沙丘移动方向在河流左侧为175°,右侧为195°,平均为185°(盛行风下风向)。该区域内,河流流向(18°)与盛行风下风向的平均交会角为167°。从沙丘移动方向可知A区的盛行风向为5°,为北风。

B区是横断面C6所贯通的矩形区域,河道为典型的辫状河型,河心滩发育;河漫滩区域较宽阔,存在洪泛河道。河漫滩外侧均分布着纵向沙丘,其脊线平行于10°线,由此可确定线形沙丘的移动方向为190°。纵向沙垄的东西两侧分布着横向沙垄,其脊线的垂线平行于15°,考虑到该区以北风为主,故横向沙丘的移动方向为195°。两类沙丘的平均移动方向为192.5°。由此可知,该区域河流流向(18°)与盛行风下风向的平均交会角为174.5°。从沙丘移动方向可知B区的盛行风向为354.5°(北风)。

C区是横断面C10所贯通的矩形区域,左侧有宽阔的常流水河道,属于辫状河型;右侧可见洪泛河道,平缓河床上分布着新月形沙丘。C区附近线形沙丘的脊线方向平行于方位角10°线。河漫滩为洪水泛滥时的沉积层;河漫滩外侧均为横向沙垄,其脊线的垂线平行于方位角10°线。因此,C区的沙丘移动方向是方位角10°线两端相反指向中的一个方向(即10°或者190°),考虑到此地段以北风为主,故此区域的线形沙丘和横向沙丘的移动方向(盛行风向)均为190°,河流流向(18°)与盛行风下风向的交会角为172°。从沙丘移动方向可知C区的盛行风向为352°(北风)。

为更清晰地揭示和田河对风沙地貌的影响,在上述A、B、C区域内各选取位于河道左侧(编号分别为C4-1、C6-1和C10-1)、横跨河道(编号分别为C4-2、C6-2和C10-2)和位于河道右侧(编号分别为C4-3、C6-3和C10-3)的典型小区(图7),以比较其地貌形态在2013年和2022年间的主要差别,分析河流对风沙地貌的影响方式。

C4-1小区(图7a)中,2013年为有水流的泛滥河道,在2022年已变为干涸河道。前者反映了和田河对沙漠局部地带的直接冲刷改造;后者反映了干涸河床的风沙化,河流对风沙地貌的影响方式由直接变为间接。C4-2小区,2013年和田河主汊道位于

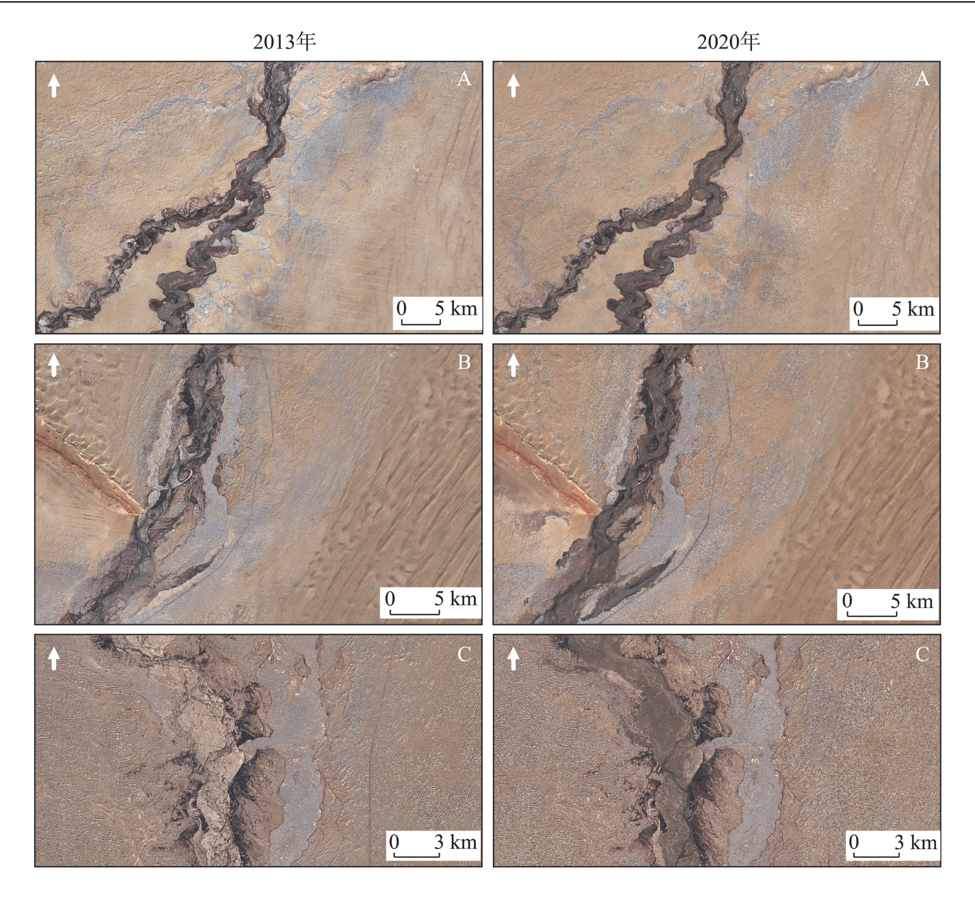


图6 研究区A、B、C区域2013年和2022年河流特征及风沙地貌分布格局

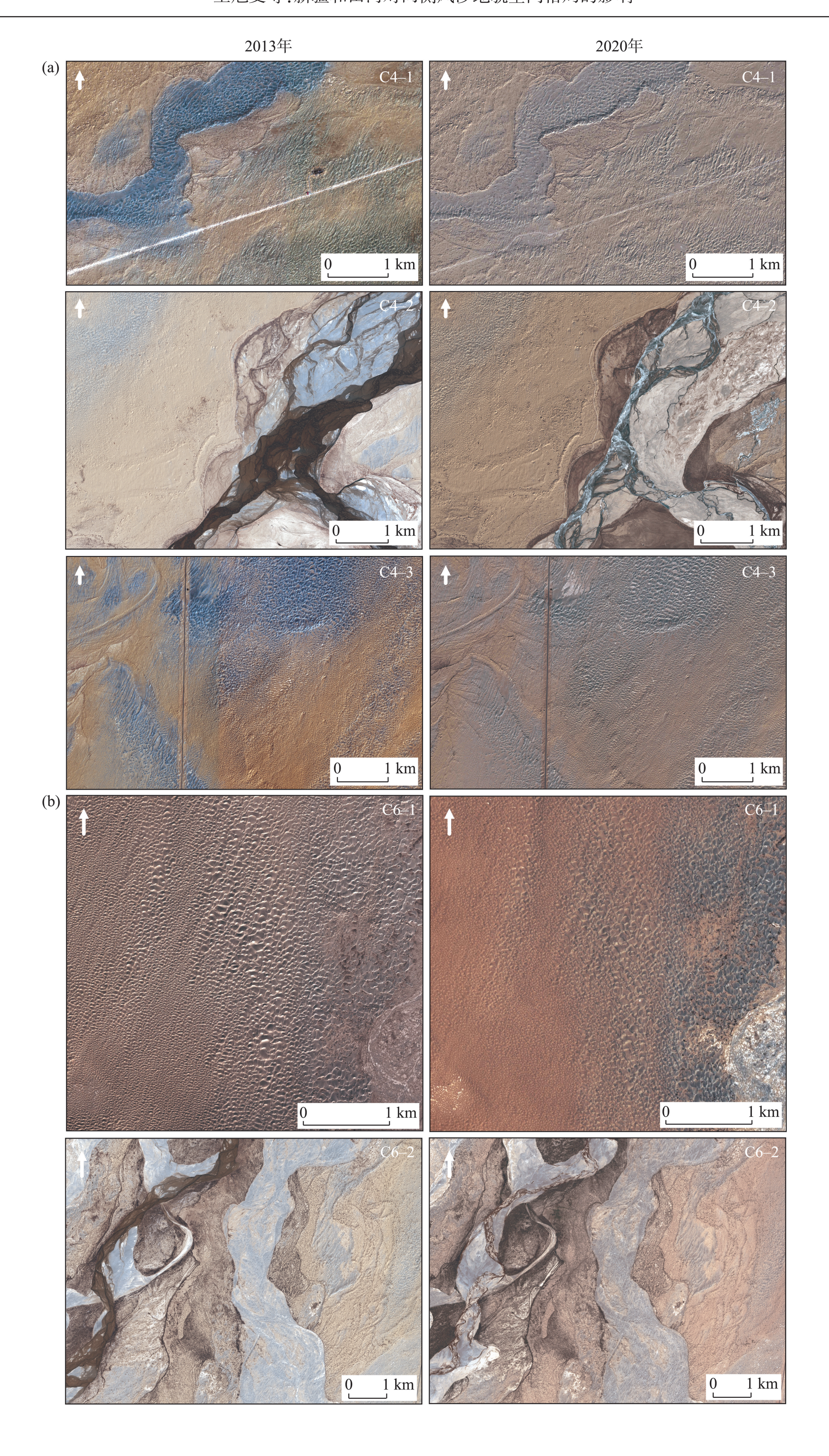
Fig. 6 Distribution patterns of fluvial and aeolian landforms in areas A, B, and C in 2013 and 2022

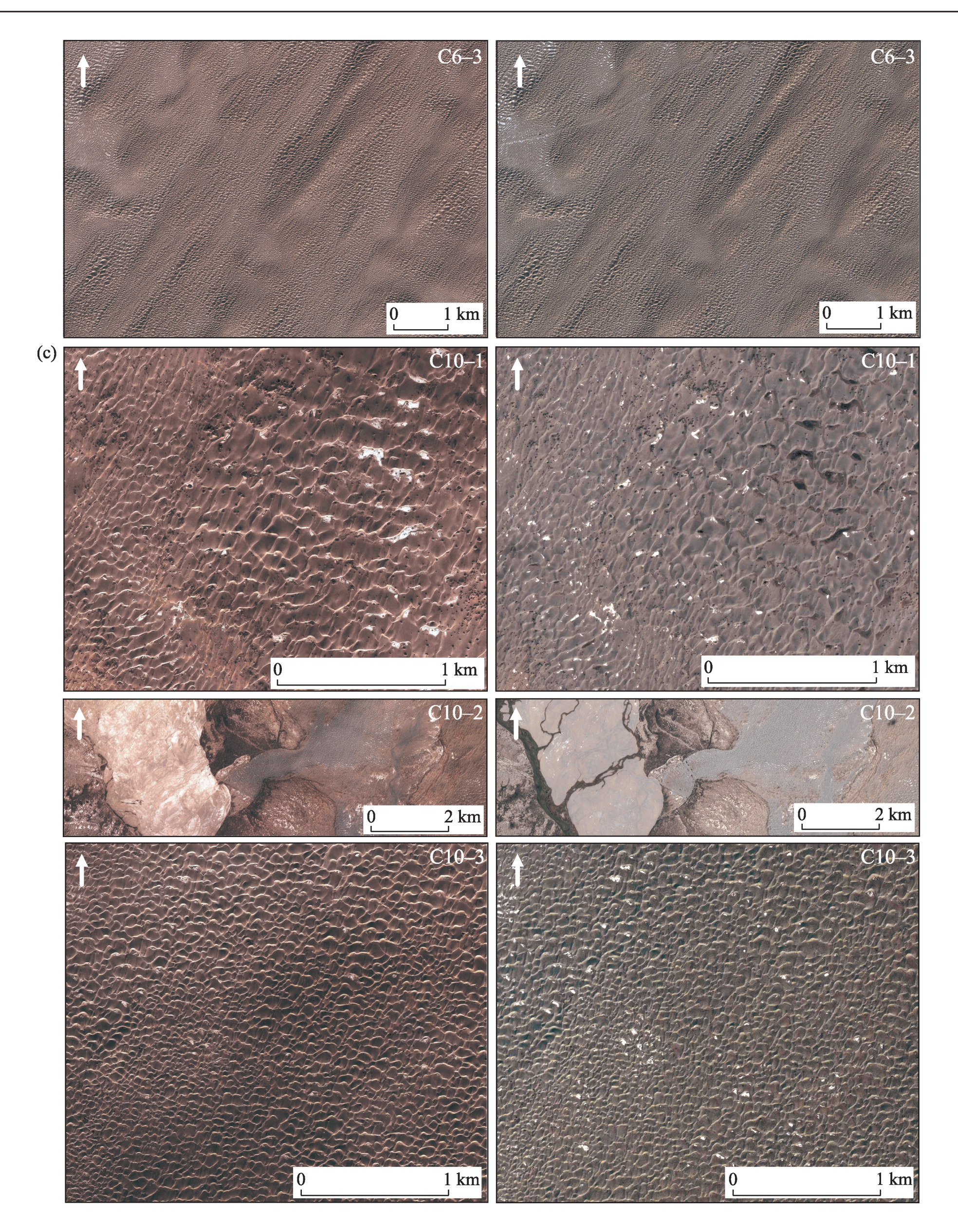
河道右部，多个小汊道和河心滩出现在河流左部；至2022年，主流转至河流左侧，右侧整体变为连片的滩地，表明河流的冲淤作用直接影响着汊道的迁移、滩地的变化和滩地上沙丘形态的调整。C4-3小区，2013年呈现蓝色的区域是和田河的泛滥区之一，至2022年，该泛滥区水体消失、植被有所发育，反映了和田河对该区域存在直接和间接的交替影响。

C6-1小区(图7b)从左向右依次出现线形沙丘、灌丛沙丘，右下角风沙区域出现泛滥河道，和田河对上述区域的影响方式依次为弱间接影响、强间接影响和直接影响。相较2013年，灌丛沙丘范围在2022年有所扩大，表明河流对这类沙丘区域的间接影响有所增强。C6-2小区的地貌主要为和田河的新老河道系统，不同时期的河道交叠分布，表明此处的河道改道频繁。辫状河频繁改道反映了来沙过多、河流过载、河床淤积强烈。C6横断面处于NDVI等值线为0.05区域的最窄处(图1b，图5)，河流西侧比邻新月形沙丘链，河岸侵蚀或沙丘迁移都为此处的河流提供了丰富的泥沙，河流的改道表明河流在冲刷、输送和再沉积来自河岸的风沙。和田河对沙漠沙的这种侵蚀、输送和再沉积作用，实际上阻截着沙漠沙丘的推进，展现了河流对河岸带风沙地貌的直接影响方式。在2013—2022年的短时期内，受流水侵蚀的影响，河流左岸岸线变化较为明显。C6-3小区为线形沙丘，位于NDVI<0.05的区域，上述时期内风沙地貌格局维持原貌。

C10-1小区(图7c)以横向沙垄为主，局部出现纵向沙垄，在上述时期均无明显变化。C10-2小区，和田河的河道宽达3 km，右岸的洪泛河道的宽度接近1 km。与2013年相比，2022年时河流左岸的沙丘明显受水流侵蚀，宽阔河床上有水流冲刷出的小汊道。右岸干涸的洪泛河道河床平缓，在风沙作用下形成新月形沙丘链。C10-3小区远离河道，以横向沙垄为主，且位于NDVI大于0.05的区域内，河流通过地下水补给等方式维持植被生长，间接影响着风沙地貌演化过程。

在和田河与两侧风沙地貌的交互作用过程中，河流流向与盛行风下风向的交会角保持在167°~174.5°，即近似对向交汇，导致河流及沙丘地貌格局在横向大致呈现如图8所示的分布模式，从河道向


2013年
2020年
(a)
C4–1
C4–2
C4–3
(b)
C6–1
C6–2
0
1 km



注:(a) C4断面小区;(b) C6断面小区;(c) C10断面小区。

图7 典型小区内河流及风沙地貌格局在2013年和2020年的变化

Fig. 7 Changes in river channel and aeolian landforms patterns in typical areas in 2013 and 2020

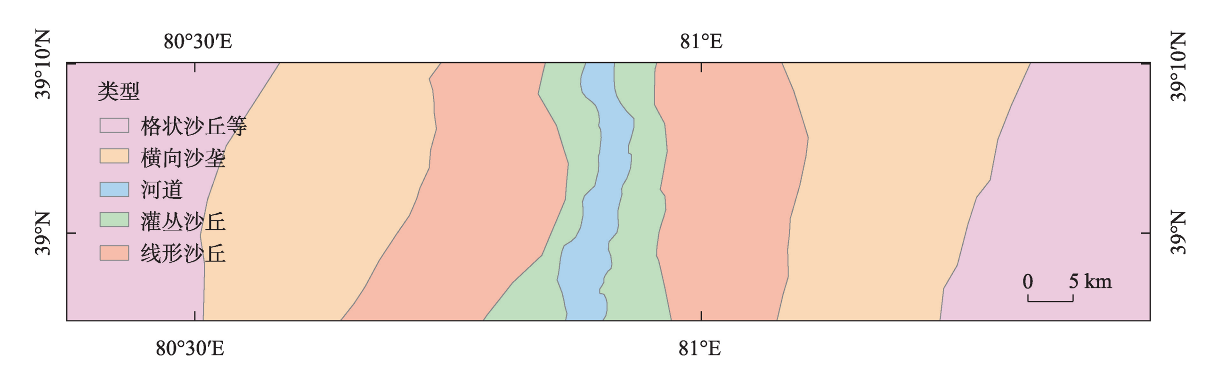


图8 和田河及两侧风沙地貌的横向分布格局

Fig. 8 Lateral distribution pattern of Hotan River and surrounding aeolian landforms

两侧依次出现灌丛沙丘、纵向沙垄(线形沙丘)、横向沙垄和格状沙丘。这是和田河流域两侧沙丘地貌的总体分布格局，局部地段会有例外。河流对风沙地貌的影响主要局限于灌丛沙丘和线形沙丘地带，有时可达横向沙垄，并且影响程度逐渐降低。

3 讨 论

从研究结果可见，和田河对交会区的风沙地貌有着较为复杂的影响，而风沙地貌对河流的影响也有不同的响应方式。该研究重在揭示河流对风沙地貌格局的影响，因此，需要了解和田河演变过程中的侧向迁移能力、反映河流动力强弱的径流量大小和输沙能力、河流流向与沙丘移动方向交会角的区域变化，判别风水交互作用中河流与风沙的相对主导程度。

3.1 河道演变及影响区域的可变性分析

河道弯曲度和比降参数可用来分析河流的潜在可变性(潜在变化程度)，其中弯曲度指标能够反映河流的侧迁移能力，其值越大，河道侧向迁移的能力越强、侧移距离越大，河流影响风沙地貌区域的可变性也就越大；比降值可以反映河流的水动力强弱，其值越大，水动力越强，水流侵蚀河床和输沙的能力越强，维持河流影响区域的稳定性也就越强。和田河及其支流在2013年和2022年的河道弯曲度和比降的空间变化如图9所示，不同河段的变化率见表2。

由图9a可见，除C3~C4河段的河道弯曲度较大外(介于1.27~1.35)，其他河段的都较小(<1.20)(图9a)，和田河的甚至小于1.17。和田河及其支流的平均弯曲度分别为1.10和1.21，所有河段弯曲度的变化率介于-1.71%~5.6%。这表明河道侧向侵蚀能力较弱、难以发生较远距离的侧向迁移，河流的影响区域不会发生显著变化。但是，在和田河的支流汇合处附近河段，以及河流末段(C10断面以下)，河道的弯曲度略大、侧向活动性较强，其影响区域的可变性较大。和田河末段2018—2021年的河流影响范围变化较大(图5a)，洪水期突发的泛滥水流，具有暂时性局部扩大河流影响范围的潜力。

河道比降在南部绿洲段支流段较大(C1~C2，图9b)，2013—2022年间变化极不明显。2006—2018年，玉龙喀什河和喀拉喀什河的年均悬移质输沙量分别为748.1×10⁴ t和51.8 ×10⁴ t[27]。这表明和田河支流河道的比降越大，水动力就越强，水流侵蚀和输沙的能力也就越强，能够向和田河输送大量的泥沙。

和田河的比降介于0.567‰~0.643‰，明显小于其支流的，故其水动力比支流的小。支流带来的泥沙部分会沉积在河道中。此外，流动沙丘入侵河道会引起局部河段暂时性沉积。虽然在2006—2018年的平均淤积厚度为0.02 m[27]，年均沉积速率为1.7 mm·a^{-1}，但是，这样小的沉积速率大致反映了和田河沉积作用略占优势、总体上接近冲淤平衡状态。这种水动力状态有助于河流长期维持既有的发展趋势，预示着河流对风沙地貌的影响区域具有相对稳定性，风水交互作用中主要由河流起主导作用。

3.2 径流量与河流影响区域的可变性分析

和田河源流径流年内高度集中、年际变化小，

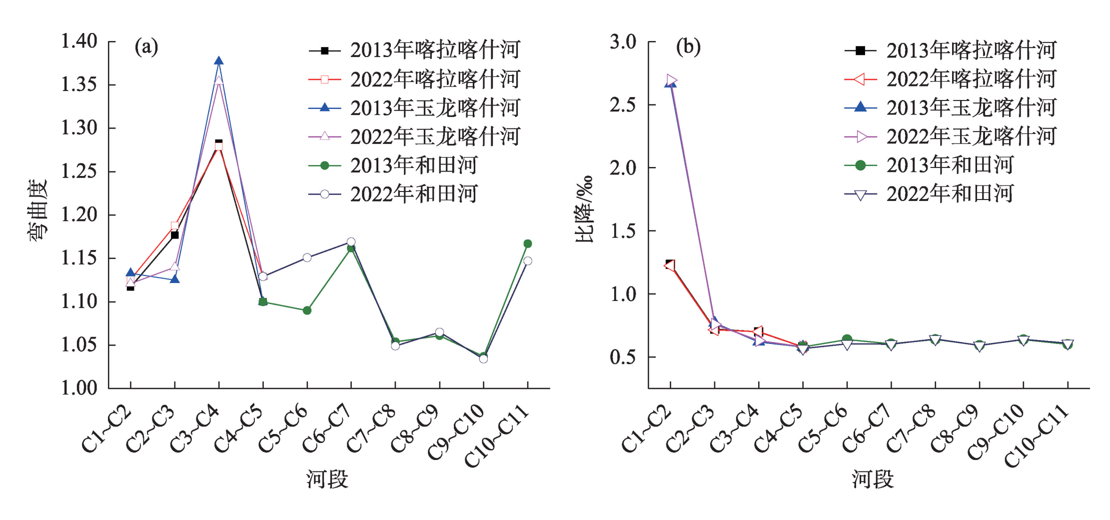


图9　和田河不同河段的河道弯曲度和河道比降变化特征

Fig. 9　Characteristics of channel sinuosity and gradient in different sections of the Hotan River

表2 和田河及其支流河道的弯曲度和比降的时空变化

Tab. 2 Spatiotemporal variations of channel sinuosity and gradient of the Hotan River and its tributaries

河流	河段	河道弯曲度		弯曲度变化率/%	河道比降/‰		比降变化率/%
		2013年	2022年		2013年	2022年	
喀拉喀什河	C1~C2	1.117	1.126	0.81	1.234	1.223	−0.89
	C2~C3	1.177	1.188	0.93	0.721	0.715	−0.83
	C3~C4	1.283	1.279	−0.31	0.699	0.701	0.29
玉龙喀什河	C1~C2	1.133	1.121	−1.06	2.664	2.694	1.13
	C2~C3	1.125	1.140	1.33	0.769	0.759	−1.30
	C3~C4	1.377	1.354	−1.67	0.619	0.630	1.78
和田河	C4~C5	1.100	1.129	2.64	0.581	0.567	−2.41
	C5~C6	1.090	1.151	5.60	0.639	0.605	−5.32
	C6~C7	1.162	1.169	0.60	0.605	0.602	−0.50
	C7~C8	1.054	1.049	−0.47	0.640	0.643	0.47
	C8~C9	1.061	1.065	0.38	0.594	0.592	−0.34
	C9~C10	1.037	1.034	−0.29	0.639	0.640	0.16
	C10~C11	1.167	1.147	−1.71	0.600	0.610	1.67

而汇入塔里木河的径流集中在夏季、年际变化大[28]，月均径流量最大值为14.45×10^8 m^3(7月)，最小值为0.82×10^8 m^3(2月)，极值比高达17.6。夏季径流量大时，和田河以较大的水力改造河床和输送泥沙，冬春季径流量小时，和田河的河床大部分裸露，成为风沙地貌的潜在物源。

沙漠河流的径流量及其耗水量，与河流影响风沙地貌的区域密切相关。据2006—2018年水文实测值，喀拉喀什河和玉龙喀什河的源流年均径流量分别为25.05×10^8 m^{3}和26.35×10^8 m^3，和田河入口和出口水文站的年均径流量分别为18.6×10^8 m^{3}和12.76×10^8 m^3。三条河流的年均耗水量分别为23.1×10^8 m^3、12.6×10^8 m^{3}和5.8×10^8 m^3[26]。显然，南部绿洲地区的耗水量很大，其中农田灌溉和生态养护的引水占据绝大部分。这种用于植被需要的耗水，既是人为影响，也是提供了水源的河流的间接影响。和田河流域南部绿洲地带，由于存在持续的引水以供给绿洲农田和生态所需，可以预见，河流对研究区南部地带植被的影响区域将会有所扩大；绿洲植被带的隔离作用，使河流对两侧风沙地貌的影响范围至少不会收缩。

位于沙漠腹地的和田河的耗水量相对较小，而且，这一较长河段的耗水为河道自然损失水量(简称河损量)，包括河道渗漏、蒸发、漫溢的水量损失总和。径流的河损量中，除了河流受太阳辐射直接蒸发的水量外，绝大部分(如渗漏、漫溢水)补充着河流两侧植被生长的需水。研究表明，喀拉喀什河、玉龙喀什河及和田河单位长度的河损量分别为310×10^4 m^3·km^{-1}、350×10^4 m^3·km^{-1}和200×10^4 m^3·km^{-1}[26]，显然，沙漠腹地的明显小于南部绿洲的，其差别决定着河流对两侧风沙地貌的影响区域，这和基于NDVI临界值划分出的南部宽、中北部窄的河流影响区域的空间分布态势基本一致(图5)。

作为塔里木河主要源流之一的和田河，承担着每年向塔里木河干流输水9×10^8 m^{3}的任务[29]，近30 a来和田河流域地下水以接近0.123 cm·a^{-1}的速度在增长[30]，这既保证了和田河向塔里木河的年输水量下限，也保障了和田河两侧植被生长所需要的径流河损量，从而维持着河流对风沙地貌影响区域的相对稳定性。

3.3 河流-风沙作用强度及主导性分析

风力和水力的相对强度决定着风水相互作用的发展态势。河流流向与盛行风下风向的交会角大小(介于0°~180°)，一定程度上能够反映风水交互作用的相对强度。假定沙丘推进速度保持不变，当盛行风向与河流呈90°交会角时，流动沙丘向河流推进的速度和供沙量均会达到最大值，河流完全输送入河的风成沙所需消耗的河流功率也将达到最大值；反之，当二者以较小的锐角或者较大的钝角交会时，风沙入河的速度和供沙量较小，河流完全输送入河的风成沙所需消耗的河流功率相对较小。同一条沙漠河流，如果其流向在中途

发生显著变化，则与风水交互作用的程度也将有所改变。

以进出沙漠起止点的连线作为河流流向[5]，和田河与盛行风下风向的交会角介于167°~174.5°，呈大钝角交会形态，表明河流与风沙地貌的相互作用强度较弱。考虑到和田河在断面C6处发生了明显的逆时针偏转，以该断面为界将和田河分为南北两段，其流向分别为40°和355°，据此计算出的A、C两个区域中河流流向与盛行风下风向（A区平均为185°、C区为190°）的交会角分别为145°和165°，较前述的有所变小，表明和田河与风沙地貌的相对作用强度实际上更大，同时，在同等条件下，A区风沙入河的数量要大于C区的，完全输送入河的风成沙所消耗的河流功率在A区的也要大于C区的。在塔克拉玛干沙漠南缘地带，和田、墨玉2个气象站的年均盛行风向平均为270°（下风向为90°），与该区域和田河流向（40°）的交会角为50°。刘鑫等[31]的研究表明，塔克拉玛干沙漠南缘新月形沙丘平均移动速率为6.86 m·a^{-1}，与盛行风方向基本一致。这种高速率的沙丘移动和风水呈大锐角交汇特征，表明沙漠南缘的河流对风沙地貌格局的影响更显著。

从和田河长期保持着穿越塔克拉玛干沙漠、维持了河道的畅通性可见，和田河在与两侧风沙地貌的交互作用中占据主导地位，这与李小妹等[18]的研究一致。

河流流量和风况的月际变化特征能从另一个视角揭示风水交互作用的强度及何者居于主导地位。据1980年代资料统计，和田河6—9月的源流平均流量（通古孜洛克站和乌鲁瓦提站的流量之和）占全年的83.6%；和田河出口站肖塔站7—9月的平均流量占全年的99.98%。这表明和田河下游段的流量仅持续3个月左右，其他月份基本断流，也即水流对风沙地貌的直接影响在和田河北段每年平均为3个月左右，相对而言，南段的持续时间要长一些。和田河南部的和田站和北端附近的阿拉尔站的月均风况存在显著差别（图10），和田站月均盛行风向为西风（281°）和西南风（236°），其下风向与和田河南段流向的交会角分别为61°和16°，为大锐角和小锐角交汇特征，前者风沙易于入河，后者不易入河。阿拉尔站的盛行风向在1月和12月为西南风（236°）外，其他月份为东北风（56°），其下风向与和田河北段流向的交会角分别为61°和119°，为大锐角和小钝角交会特征，2种情况下风沙都易于

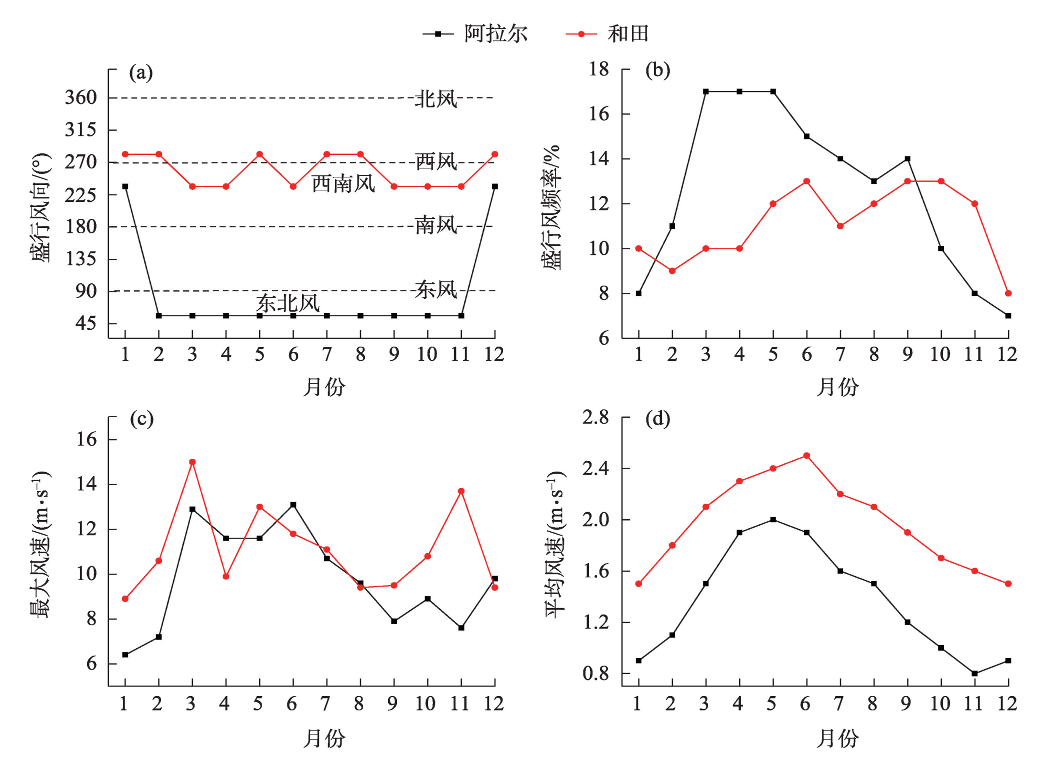


图10　和田河南北两端1991—2020年月均风况特征

Fig. 10　Characteristics of the monthly average wind conditions at the north and south ends of the Hotan River from 1991 to 2020

输入河道。最大风速和平均风速在和田河北段的总体上大于其南段的，这又表明风沙对河流的影响在北段的明显大于南段的。

综上所述，从流量的年内分配、河流与盛行风向的交会角特征，以及风速大小可见，水沙作用强度及河流对风沙地貌格局的主导作用在和田河南段的要大于北段的，存在着明显的空间差异性。

4 结 论

通过对穿越塔克拉玛干沙漠的和田河与其两侧风沙地貌间的交互作用的研究、典型断面上NDVI变化和沙丘分布格局的分析，得出下述主要结论：

（1）NDVI为0.05是和田河对风沙地貌格局影响范围的临界值。依据NDVI多年平均值的空间分布，确定了和田河对两侧风沙地貌的影响区域的面积为20700 km^2，宽度介于6~121 km。

（2）和田河与风沙地貌交汇区，河流作用起着主导性，但风水交互作用的强度在南北两个河段不完全相同，基于风沙入河的潜在速率、河流输沙的能耗率及风向风速月际变化可知，风水交互作用在和田河南北有别，其中南段为完全由河流主导、北段为主要由河流主导。

（3）河流与风沙过程的长期交互作用下，和田河两侧风沙地貌格局呈现出一定的规律性，即从交汇区的河道向两侧，依次出现灌丛沙丘、线形沙丘、横向沙垄和格状沙丘。但不排除局部可能存在的例外情况。

（4）和田河的河道地貌形态变化较小，不足以引起河道发生大范围的侧向迁移，基于此，河道演变总体上不会引起河流影响区域的明显变化。径流量的季节性变化和偶发的河水漫溢等，引起局部河段河流影响区域的年际可变性，但不会改变其长期形成的平均影响区域。

致 谢 研究工作得到有关老师的指导和同学的帮助，在此表示衷心感谢！

参考文献（References）：

[1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Wu Zheng. Aeolian Landform and Sand Control Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003.]

[2] El-Baz F, Maingue M, Robinson C. Fluvio-aeolian dynamics in the north-eastern Sahara: The relationship between fluvial/aeolian systems and ground-water concentration[J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(2): 173−183.

[3] Smith N D, Smith D G. William River: An outstanding example of channel widening and braiding caused by bed-load addition[J]. Geology, 1984, 12(2): 78−82.

[4] Bourke M C, Ewing R C, Finnegan D, et al. Sand dune movement in the Victoria Valley, Antarctica[J]. Geomorphology, 2009, 109 (3−4): 148−160.

[5] Liu B, Coulthard T J. Mapping the interactions between rivers and sand dunes: Implications for fluvial and aeolian geomorphology[J]. Geomorphology, 2015, 231: 246−257.

[6] 宋阳, 刘连友, 严平. 风水复合侵蚀研究述评[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 77−88. [Song Yang, Liu Lianyou, Yan Ping. A review on complex erosion by wind and water research[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 77−88.]

[7] Bullard J E, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments[J]. Area, 2002, 34(1): 8−16.

[8] Krapf C B E, Stollhofen H, Stanistreet I G. Contrasting styles of ephemeral river systems and their interaction with dunes of the Skeleton Coast erg (Namibia)[J]. Quaternary International, 2003, 104(1): 41−52.

[9] Field J P, Breshears D D, Whicker J J. Toward a more holistic perspective of soil erosion: why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions[J]. Aeolian Research, 2009, 1(1−2): 9−17.

[10] Draut A E. Effects of river regulation on aeolian landscapes, Colorado River, southwestern USA[J]. Journal of Geophysics Research, 2012, 117: F02022.

[11] Yu L P, Lai Z P, An P, et al. Aeolian sediments evolution controlled by fluvial processes, climate change and human activities since LGM in the Qaidam Basin, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2015, 372: 23−32.

[12] 李永山, 彭文昌, 任亮, 等. 近50年黄河乌兰布和沙漠段辫状河道演变[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1689−1694. [Li Yongshan, Peng Wenchang, Ren Liang, et al. Evolution of Ulan Buh Desert braided channel of the Yellow River in recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1689−1694.]

[13] Kirkby M J. The Stream Head as A Significant Geomorphic Threshold[D]. Leeds, UK: University of Leeds, 1978.

[14] Al-Masrahy M A, Mountney N P. A classification scheme for fluvial-aeolian system interaction in desert-margin settings[J]. Aeolian Research, 2015, 17: 67−88.

[15] Zhao Y, Gao X, Lei J, et al. Interactions between paleochannels and aeolian processes and their implications on aeolian dune patterns[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1176−1192.

[16] Song Q, Gao X, Lei J, et al. Spatial distribution of sand dunes and their relationship with fluvial systems on the southern margin of

the Taklimakan Desert, China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 2408-2428.

[17] Yan P, Li X M, Ma Y F, et al. Morphological characteristics of interactions between deserts and rivers in northern China[J]. Aeolian Research, 2015, 19: 225-233.

[18] 李小妹, 严平. 中国北方地区沙漠与河流景观格局[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1198-1208. [Li Xiaomei, Yan Ping. Landscape pattern characteristics of deserts and rivers in Northern China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1198-1208.]

[19] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [Zhu Zhenda, Chen Zhiping, Wu Zheng, et al. Research on Aeolian Landform in the Taklamakan Desert [M]. Beijing: Science Press, 1981.]

[20] 朱震达, 吴正, 李钜章, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[J]. 科学通报, 1966(13): 620-624. [Zhu Zhenda, Wu Zheng, Li Juzhang, et al. Research on aeolian landform in the Taklamakan Desert[J]. Science Bulletin, 1966(13): 620-624.]

[21] Wang H, Jia X. Field observations of windblown sand and dust in the Taklimakan Desert, NW China, and insights into modern dust sources[J]. Land Degradation Development, 2013, 24(4): 323-333.

[22] Zu R, Xue X, Qiang M, et al. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China[J]. Geomorphology, 2008, 96(1-2): 39-47.

[23] 肖方, 李肖, 李承森, 等. 认识塔克拉玛干沙漠[J]. 生命世界, 2019(2): 52-53. [Xiao Fang, Li Xiao, Li Chengsen, et al. Understanding the Taklamakan Desert[J]. The World of Life, 2019(2): 52-53.]

[24] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. Global Planet Change, 2006, 52(1-4): 1-22.

[25] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(24): 5-8.

[26] 余其鹰, 白云岗, 张江辉, 等. 和田河流域干流河道耗水过程分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 73-79. [Yu Qiying, Bai Yungang, Zhang Jianghui, et al. Analysis of water consumption process in the main stream of Hotan River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(2): 73-79.]

[27] 韩兴胜, 陈雄波. 和田河河道冲淤特性分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(S1): 26-28. [Han Xingsheng, Chen Xiongbo. Analysis of erosion and deposition characteristics of Hotan River channel[J]. Yellow River, 2024, 46(S1): 26-28.]

[28] 黄领梅, 沈冰. 和田河汇入塔里木河径流演变及成因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 26-28. [Huang Lingmei, Shen Bing. Analysis on runoff evolution and cause of Hotan River flowing into the Tarim River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(2): 26-28.]

[29] 李卫红, 黎枫, 陈忠升, 等. 和田河流域平原耗水驱动力与适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1161-1168. [Li Weihong, Li Feng, Chen Zhongsheng, et al. Analysis of driving force of water consumption in plain and suitable scale of oasis in Hotan River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33 (5): 1161-1168.]

[30] 夏婷婷, 薛璇, 王灏伟, 等. 昆仑山北坡陆地水储量变化及其驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(8): 1292-1303. [Xia Tingting, Xue Xuan, Wang Haowei, et al. Changes in terrestrial water storage and its drivers on the north slope of Kunlun Mountains[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(8): 1292-1303.]

[31] 刘鑫, 高鑫. 塔克拉玛干沙漠南缘新月形沙丘移动特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 661-673. [Liu Xin, Gao Xin. Migration velocity of barchan dunes at the southern margin of the Taklamakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 661-673.]

Effect of the Hotan River on the spatial pattern of surrounding eolian landforms in Xinjiang

WANG Xumin[1,2], GAO Xin[1], HU Zihao[3], ZHOU Jie[1]

(1. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. University of Emergency Management, Beijing 101601, China)

Abstract: The interaction between wind and water is key in shaping the morphology and spatial distribution of eolian landforms. Quantifying the influence of rivers on eolian landforms has always been challenging. This work selected the Hotan River, which crosses the Taklamakan Desert and the surrounding eolian landforms, as the research object. Based on high-resolution remote-sensing images, DEM and NDVI data, comparing relevant characteristic parameters of typical cross-sections, and analyzing the pattern of eolian landforms and the changes in river channel morphological parameters, the following results were obtained. (1) In the intersection area of the Hotan River and eolian landforms, NDVI=0.05 can be used as a critical value to distinguish the influence of rivers on the pattern of eolian landforms. Consequently, the spatial distribution of the area affected by the Hotan River on eolian landforms is revealed: its area is 20700 km^2 and its width ranges from 6 to 121 km. (2) The channel morphology of the Hotan River changes little, making it difficult to cause long-distance lateral migration of the river channel; the impact area on the surrounding eolian landforms will not change significantly. In the process of the interaction between wind and water, the Hotan River plays a leading role. Moreover, the southern section belongs to the fully fluvial dominant type, while the northern section belongs to the mostly fluvial dominant type. (3) The distribution pattern of eolian landforms that can be recognized as sabkhas, longitudinal dunes, transverse ridges, and reticulate dunes in sequence from the river channel to both sides results from long-term interactions between wind and water.

Keywords: Hotan River; aeolian landform pattern; dune type; interaction between wind and water; Taklamakan Desert